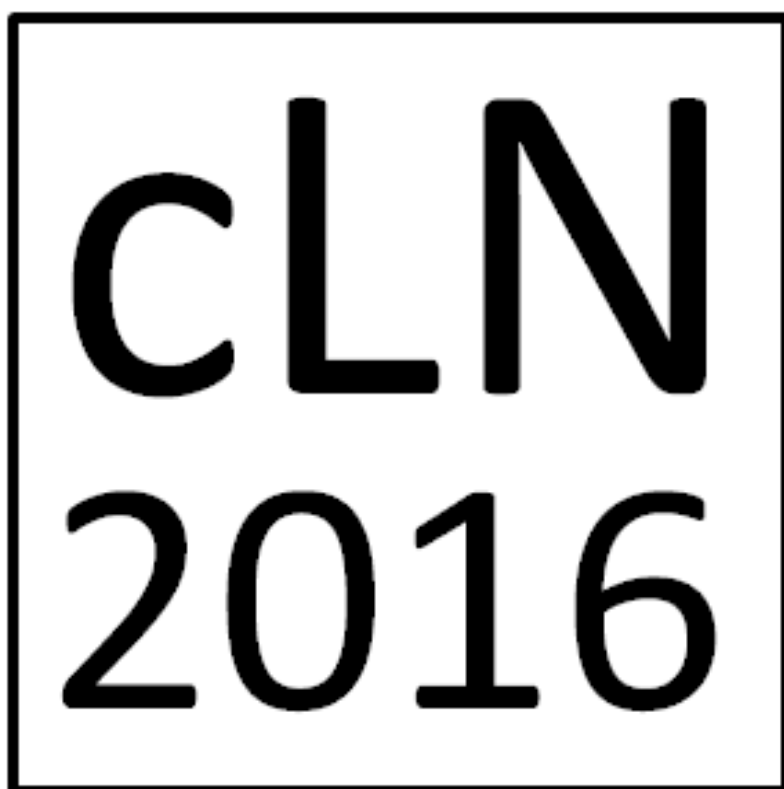


17ème  
colloque **Louis Néel**



Couches minces et nanostructures magnétiques

Saint-Dié-des-Vosges  
29 mars - 1 avril 2016



## Auto-oscillations induites par couple spin-orbite dans des disques de YIG

**M. Collet<sup>1\*</sup>, X. de Milly<sup>2</sup>, O. d'Allivy Kelly<sup>1</sup>, V. V. Naletov<sup>2</sup>, R. Bernard<sup>1</sup>, P. Bortolotti<sup>1</sup>, J. Ben Youssef<sup>3</sup>, J. L. Prieto<sup>4</sup>, M. Munoz<sup>5</sup>, V. Cros<sup>1</sup>, A. Anane<sup>1</sup>, G. de Loubens<sup>1</sup>, and O. Klein<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Unité Mixte de Physique CNRS Thales, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

<sup>2</sup> Service de Physique de l'Etat Condensé, CNRS, CEA Saclay, France

<sup>3</sup> Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Magnétisme de Bretagne, CNRS, Brest, France

<sup>4</sup> Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (UPM), Madrid, Spain

<sup>5</sup> Instituto de Microelectrónica de Madrid (CNM, CSIC), Madrid, Spain

\* [martin.collet@thalesgroup.com](mailto:martin.collet@thalesgroup.com)

Une nouvelle direction en spintronique, appelée spin-orbitronique, vise à exploiter des effets liés au couplage spin-orbite (SOC) i.e. effet Hall de spin (SHE) ou effet Edelstein-Rashba (ERE) au lieu de l'interaction d'échange pour générer, détecter et manipuler des courants de spin. Cela ouvre la voie pour le développement de dispositifs spintroniques basés non seulement sur des matériaux non magnétiques mais aussi qui ne nécessitent plus un champ magnétique pour fonctionner. De plus, et c'est l'objectif principal de cette étude, cette approche permet d'ouvrir le champ de la spintronique à des matériaux isolants magnétiques qui présentent intrinsèquement d'excellentes propriétés dynamiques et dont le représentant le plus connu est le grenat d'Yttrium (YIG).

Dans cette étude, nous montrons de façon non ambiguë la mise en précession de l'aimantation d'une couche mince de YIG (20 nm) dans des microstructures de YIG/Pt. Cette dynamique cohérente de l'aimantation est induite en faisant passer un courant électrique dans la couche de Pt (le YIG étant un parfait isolant électrique). Nous attribuons nos observations à un couple de transfert de spin induit sur l'aimantation du YIG par l'accumulation de spin dans le Pt à l'interface YIG/Pt. Nous démontrons que cette accumulation de spin a la symétrie attendue du SHE existant dans le Pt.

En 2010, Kajiwara *et al.* ont annoncé qu'ils pouvaient transférer efficacement du spin par SHE à partir d'un film de Pt en contact avec une couche épaisse (1.3  $\mu\text{m}$ ) de YIG [1]. Ce résultat a suscité un énorme intérêt. Malgré des efforts importants consentis par un grand nombre d'équipes, le résultat principal de cet article de Kajiwara n'a pas pu être reproduit à ce jour. Un des objectifs de notre étude est d'apporter des réponses pour expliquer cette difficulté à reproduire ce résultat, en particulier liée à la compétition entre différents modes existants dans les films de YIG. Notre approche a été de lever la dégénérescence de modes en utilisant le confinement géométrique des modes propres d'excitation. Dans ce but, nous avons microstructuré nos films de YIG et fabriqué des séries de micro-disques de 2 et 4  $\mu\text{m}$  de diamètre à base d'une bicouche  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG) (20nm)\Pt (7nm) [2]. Dans une précédente étude, nous avons démontré notre capacité à faire croître par ablation laser pulsée des films ultra-minces de YIG de très bonne qualité caractérisés par un très faible coefficient de Gilbert  $\alpha_0 = 2 \times 10^{-4}$  [3]. Dans le but d'injecter un courant dans le Pt pour générer l'accumulation de spin interfaciale, nous avons élaboré d'une part des contacts électriques dc. La mesure de la dynamique d'aimantation étant effectuée par le biais une antenne radiofréquence couplée inductivement au disque. Les disques, les contacts dc ainsi que l'antenne radiofréquence sont définis par lithographie électronique (Fig.1a).

Sur la Fig. 2.a, nous présentons un spectre enregistré à l'analyseur de spectre sur l'antenne couplées inductivement au disque de YIG. Celui-ci montre un pic proche de la fréquence FMR pour le champ magnétique donné avec un courant dc de -15 mA passant dans la couche de Pt. Etant donné que seul un courant électrique dc alimente le dispositif. Nous attribuons ce pic à une mise en auto-oscillations de l'aimantation du YIG. Afin de clarifier l'origine physique de cette mise en auto-oscillation et notamment afin de prouver qu'elle est comme attendu induite par le couple SHE, nous montrons dans la Fig. 2.b

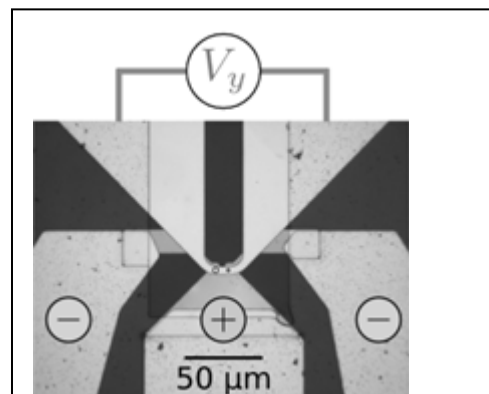
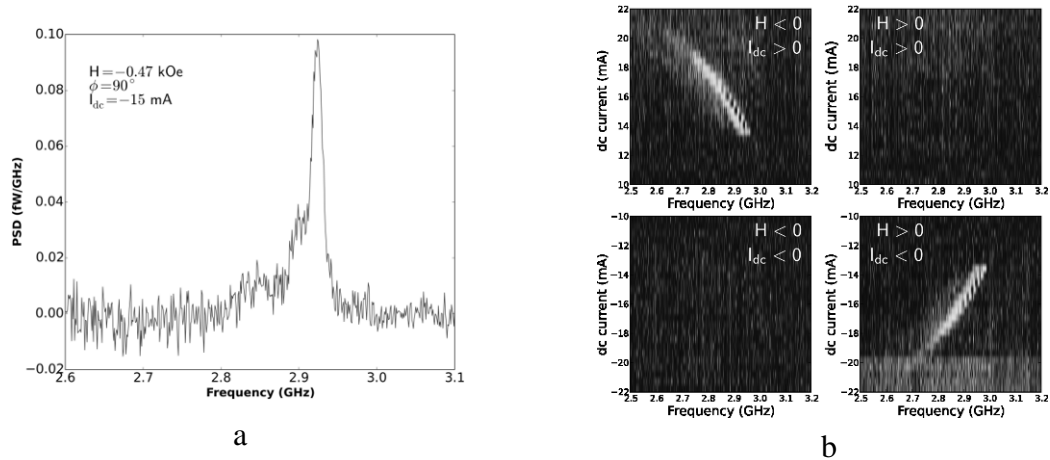


Fig 1., Photo de l'échantillon avec la détection inductive des auto-oscillations sur l'antenne.

une cartographie de la densité spectrale obtenues pour différentes symétries du courant  $I_{dc}$  et du champ planaire appliqué  $H$ . Pour deux configurations i.e.  $I_{dc} > 0$ ,  $H < 0$  et  $I_{dc} < 0$ ,  $H > 0$ , nous observons clairement un signal rf associé à l'excitation de l'aimantation du YIG par SHE. Il est important de préciser qu'aucun champ ou courant rf n'est appliqué pour ces mesures. Cette observation constitue le résultat principal de cette étude. En effet, il démontre pour la première fois depuis Kajiwara *et al.* que des auto-oscillations d'aimantation par couple SHE peuvent être induites dans un couche mince d'isolant magnétique. Le courant critique que nous trouvons correspond à une densité de courant de ( $\sim 10^{11}$  A.m<sup>-2</sup>) ce qui est plusieurs ordres de grandeurs supérieurs à la valeur trouvée par Kajiwara *et al.* et explique la difficulté à réaliser cette expérience et surtout la nécessité de travailler avec des couches de YIG d'épaisseurs nanométriques et des microstructures permettant au moins en partie de lever la dégénérescence des modes d'ondes de spin. La densité de courant critique que nous trouvons est en parfait accord avec les prédictions théoriques avec la nuance que la dissipation à prendre en compte dans le calcul théorique ne doit pas se limiter à la partie homogène de la dissipation (provenant du coefficient de Gilbert) mais doit aussi inclure l'élargissement inhomogène qui reste présent dans nos microstructures, la levée de dégénérescence des modes n'étant que partielle.

En analysant les caractéristiques de ces auto-oscillations, nous notons cependant que leurs amplitudes restent faibles (les puissances mesurées sont de 2.9fW pour le disque de 4  $\mu$ m et 0.7 fW pour le 2  $\mu$ m). De plus, elles ne sont observables dans une gamme de champs et courant limitées (Fig.2), probablement dû au couplage non-linéaire entre le mode FMR et des modes quasi-dégénérées qui devient plus important avec l'augmentation du courant dc.

Ces résultats démontrent la possibilité d'exciter électriquement la dynamique d'aimantation d'un isolant magnétique (le YIG) dans des microstructures artificielles par couple de transfert de spin induit par SHE. Grace à son amortissement intrinsèque sans rival YIG est le matériau de choix pour la magnoniques, nos résultats ouvrent la possibilité de concevoir des dispositifs magnoniques actifs à base de films ultra-minces de YIG.



**Fig 2.a**, Spectre enregistrée à l'analyseur de spectre pour un champ externe de -0.47 kOe et un courant  $I_{DC} = -15$  mA. **b**, Densité de puissance spectrale enregistrée à l'analyseur de spectre pour un champ perpendiculaire  $|H| = 0.47$  kOe. Les symétries des signaux observés confirment que l'excitation de la dynamique d'aimantation dans le YIG est induite par le couple de transfert de spin associé à l'effet SHE du Pt.

- [1] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Nature* **464**, 262 (2010).
- [2] accepté à *Nature Communications* : M. Collet, X. de Milly, O. d'Allivy Kelly, V. V. Naletov, R. Bernard, P. Bortolotti, V. E. Demidov, S.O. Demokritov, J. Ben Youssef, J. L. Prieto, M. Munoz, V. Cros, A. Anane, G. de Loubens, and O. Klein, [arXiv:1504.01512](https://arxiv.org/abs/1504.01512) (2015).
- [3] O. d'Allivy Kelly, A. Anane, R. Bernard, J. Ben Youssef, C. Hahn, A. H. Molpeceres, C. Carretero, E. Jacquet, C. Deranlot, P. Bortolotti, R. Lebourgeois, J.-C. Mage, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, and A. Fert, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 8 (2013).